

ANALISIS PENGGUNAAN BALOK RAFTER HONEYCOMB UNTUK STRUKTUR GUDANG TAHAN GEMPA DENGAN METODE LRFD

JEPLY MURDIAMAN GUCI¹, FEBI PUTRI YASTARI^{1*}

¹Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas.

*Corresponding Author : ✉ febiputri@eng.unand.ac.id

Naskah diterima : 13 November 2024. Disetujui: 28 Desember 2024.. Diterbitkan : 30 Desember 2024.

ABSTRAK

Perencanaan struktur tahan gempa merupakan aspek penting dalam konstruksi bangunan di wilayah rawan gempa. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis balok *rafter honeycomb* menggunakan metode Load and Resistance Factor Design (LRFD) pada struktur bangunan gudang tahan gempa. Lokasi analisis pada struktur ini dilakukan untuk gudang yang berada di wilayah Bekasi. Penelitian ini menggunakan metode LRFD yang mencakup tahapan analisis pembebanan, perancangan elemen struktur, dan evaluasi kinerja struktur terhadap beban gempa. Analisis pembebanan dilakukan berdasarkan standar SNI 1726:2019, sementara perancangan elemen struktur dilakukan menggunakan software analisis struktur. Evaluasi kinerja struktur dilakukan dengan menguji kapasitas struktur dalam menghadapi beban gempa. Balok *honeycomb* dipilih karena kemampuannya untuk mengurangi berat struktur tanpa mengorbankan kekuatan dan kekakuan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa profil HC 900x200x11x17 memadai sebagai *rafter* atau kuda-kuda dan struktur gudang menggunakan balok *rafter honeycomb* dinyatakan cukup kokoh dan aman dalam menghadapi potensi beban gempa.

Kata kunci : *Desain, Gudang, LRFD, Rafter, Honeycomb*

1. PENDAHULUAN

Indonesia berada di titik pertemuan empat lempeng tektonik dunia dan dilalui oleh dua sabuk gempa utama, yaitu sabuk gempa Asia dan Pasifik. Sabuk gempa Pasifik ini juga disertai dengan banyak gunung berapi aktif, sehingga wilayah ini dikenal dengan sebutan Cincin Api Pasifik (Morante-Carballo et al., 2024). Kondisi ini membuat Indonesia rawan terhadap gempa bumi yang dapat mengakibatkan kerusakan atau keruntuhan bangunan.

DOI : <https://doi.org/10.25077/jbkd.2.4.243-253.2024>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

Karena itu, dalam merancang struktur bangunan, perencanaan harus sesuai dengan standar yang berlaku untuk mengurangi risiko kegagalan struktural. Selain mempertimbangkan fungsionalitas, bangunan juga harus dirancang dengan kemampuan untuk menanggulangi gempa sesuai dengan potensi seismik di masing-masing daerah.

Pesatnya perkembangan bisnis pergudangan, investor dan pemilik dituntut untuk memperluas operasional secara cepat, memerlukan gudang yang efisien untuk mendukung aktivitas logistik. Salah satu inovasi yang dapat meningkatkan kinerja struktur adalah penerapan balok *rafter honeycomb*, yang dirancang untuk meningkatkan kekakuan dan memungkinkan bentang lebih luas (Tsavdaridis et al., 2015). Balok *honeycomb* adalah balok berbentuk I yang memiliki lubang-lubang pada bagian web. Lubang-lubang ini dapat berbentuk *poligon*, lubang memanjang, lingkaran, atau biasanya segi enam beraturan. Dibandingkan dengan balok H konvensional yang memiliki web solid, balok *honeycomb* menawarkan penghematan material, pengurangan berat, peningkatan kapasitas daya dukung, serta kekakuan yang lebih baik. Dengan keunggulan tersebut, struktur balok *honeycomb* memiliki nilai ekonomi yang tinggi dan potensi aplikasi luas dalam berbagai bidang teknik, seperti kedirgantaraan, konstruksi jembatan, pembuatan kapal, dan crane industry (Feng et al., 2022).

Konsep perencanaan struktur serta kriteria desain yang diterapkan terhadap komponen-komponen struktural bangunan warehouse sangat penting untuk memastikan keamanan dan efisiensi konstruksi. Perencanaan struktur bangunan gudang tahan gempa membutuhkan pendekatan yang sistematis untuk memastikan keamanan dan keandalan konstruksi (Calledda et al., 2021). Metode LRFD (Load and Resistance Factor Design) untuk perencanaan struktur baja diatur dalam SNI 1729:2020 (Badan Standardisasi Nasional, 2020b) yang diadaptasi dari spesifikasi AISC 360-16. LRFD menganalisis pembebanan pada kondisi *ultimate* dengan menggunakan kombinasi beban terfaktor (*factored load combination*). Metode ini memastikan keamanan lebih rasional dengan mempertimbangkan variasi material, metode konstruksi, dan jenis beban, di mana beban dengan ketidakpastian tinggi, seperti angin dan gempa, diberi faktor lebih besar. Selain meningkatkan efisiensi desain tanpa mengurangi keamanan, LRFD juga mendukung optimalisasi material dan desain berkelanjutan, sesuai standar internasional.

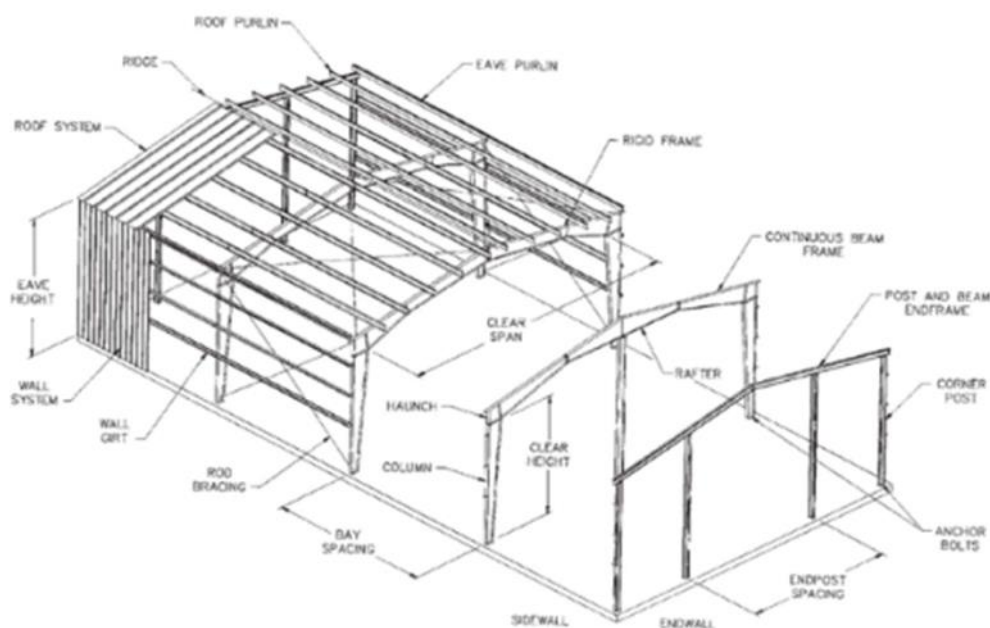
Jenis bangunan yang dibahas dalam tulisan ini adalah gudang dengan struktur balok *rafter Honeycomb Beam* menggunakan bahan baja WF (*Wide Flange*). Permasalahan utama pada bangunan gudang dengan bentang lebar adalah masalah lendutan. Semakin besar bentang, semakin besar pula lendutan (deformasi) yang terjadi pada balok akibat reaksi terhadap beban luar (Suhana & Mudofar, n.d.). Selain itu, gaya aksial yang bekerja pada balok juga menyebabkan lendutan, ditambah dengan pengaruh beban *lateral* seperti angin dan gempa yang memperbesar deformasi tersebut. Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan rekayasa struktur yang efektif agar masalah lendutan dapat diminimalkan. Salah satu alternatifnya adalah dengan mempertahankan bentang lebar, baik dengan meningkatkan dimensi profil baja maupun menggunakan struktur balok *rafter Honeycomb Beam* sebagai solusi rekayasa yang lebih efisien.

Dalam penelitian ini, perhitungan struktur baja *rafter honeycomb* dilakukan sesuai dengan peraturan yang berlaku. Hasil dari analisis ini kemudian digunakan untuk menghasilkan output melalui modelisasi struktur yang disusun. Dengan demikian, penelitian ini

diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan desain bangunan gudang tahan gempa yang efisien dan andal.

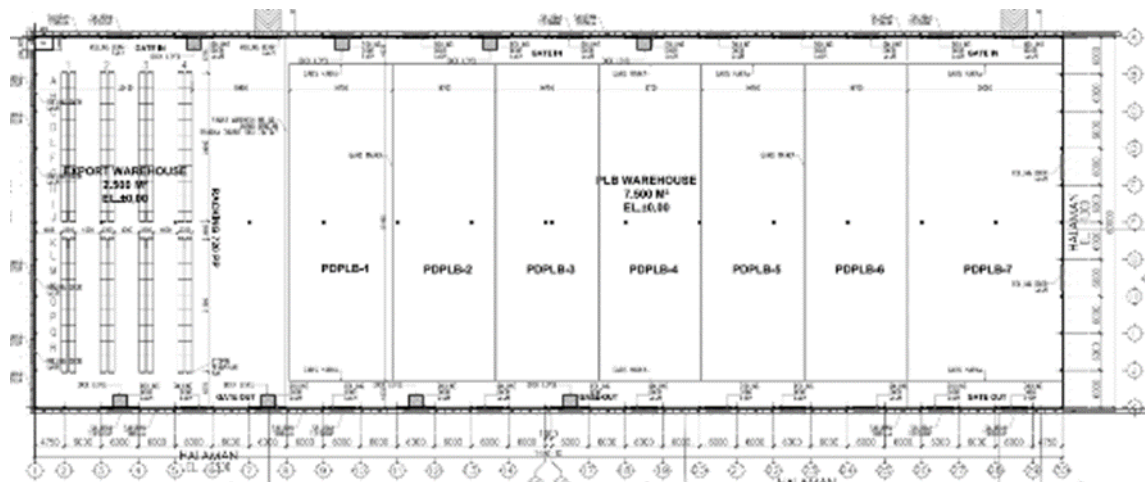
2. METODA PENELITIAN

Elemen paling mendasar yang digunakan pada bangunan industri seperti struktur warehouse ini yaitu terdiri dari kolom dan balok. Dalam suatu bangunan industri semua komponen bersatu menjadi satu komponen yang membentuk suatu sistem utuh. Terdapat beberapa komponen yang hampir selalu ada pada bangunan industri seperti rangka utama, *purlin*, *girts*, *bracings*, nok atap, dan kolom *post*. Pada gambar di bawah disajikan secara lengkap gambaran bagaimana komponen bangunan industri membentuk suatu sistem yang utuh.

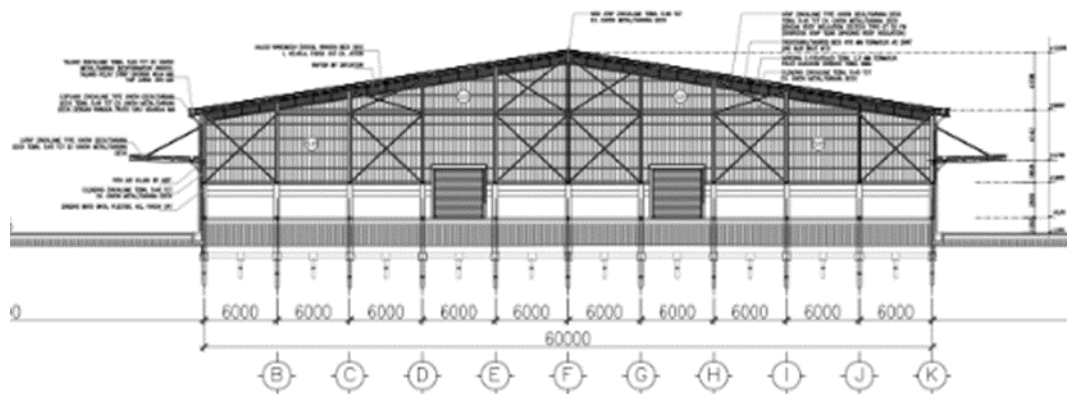


Gambar 1. Komponen pada Bangunan Warehouse

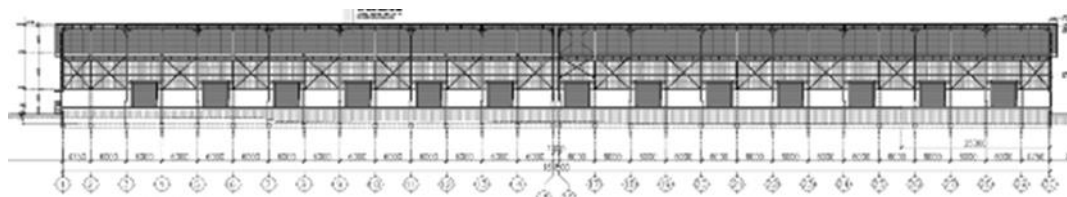
Perencanaan struktur ini dilakukan pada struktur Gudang yang berada di wilayah Bekasi dengan mengikuti semua ketentuan dan peraturan yang berlaku, yaitu SNI 2847-2019- Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung, SNI 7860-2020 – Ketentuan Seismik Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural, SNI 1727-2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan, SNI 1726-2019 – Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung, SNI 2052-2017 – Baja Tulangan Beton, dan SNI 7860-2020 – Ketentuan Seismik Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural. Denah dan potongan dari bangunan gudang ditunjukkan pada gambar-gambar berikut:



Gambar 2. Denah Bangunan Gudang



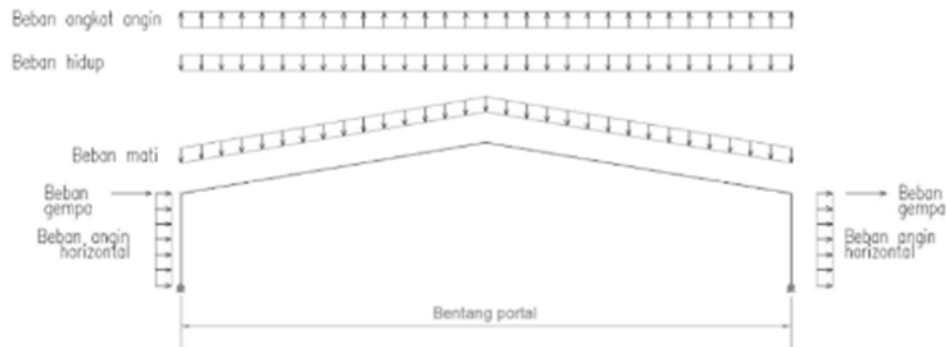
Gambar 3. Potongan Melintang



Gambar 4. Potongan Memanjang

Dalam proses perancangan elemen struktur dan evaluasi kinerja struktur, digunakan *software* ETABS untuk analisis dan desain struktur gedung secara menyeluruh, serta IDEA StatiCa untuk analisis detail sambungan struktur baja. Mutu seluruh material yang digunakan dalam perencanaan struktur ini antara lain yaitu Beton $f_c' 29.05$ MPa (K-350), Baja Tulangan BJTP-280 (Tulangan Polos, $f_y = 280$ MPa) BJTS-420 (Tulangan Ulir, $f_y = 420$ MPa), Baja Profil BJ37 ($f_y = 240$ MPa) ASTM - A36, Baut & Angkur A325 / ST - 41, Las AWS E - 70XX, Wire Mesh U 50 = 5000 kg/cm². Semua elemen struktur yang didesain perlu memiliki kekuatan yang cukup untuk mengakomodir beban yang ada. Beban dapat bekerja baik secara gravitasi ataupun secara *lateral*. Pada bangunan industri alur beban umumnya dimulai dari atap. Atap akan menahan beban vertikal yang terdiri dari berat sendiri struktur,

beban mati tambahan pada atap, beban hujan, serta beban hidup untuk proses perawatan bangunan. Pada atap dengan sudut yang tidak besar, umumnya terjadi angin hisap yang mengakibatkan gaya angkat pada atap. Di kawasan yang berpotensi mengalami risiko tekanan angin yang tinggi, atap perlu didesain dengan kekuatan yang memadai.



Gambar 5. Beban yang Terjadi pada Bangunan Warehouse

Metode perencanaan struktur beton bertulang dilakukan dengan menggunakan metode *Load and Resistance Factor Design* (LRFD). Filosofi dari metode desain dengan menggunakan pendekatan LRFD adalah dengan menjamin bahwa kekuatan kapasitas dari elemen struktur yang tersedia lebih besar dari beban yang bekerja pada elemen struktur tersebut, sehingga kegagalan struktural dapat dicegah.

Untuk memenuhi persyaratan di atas, dipergunakan faktor reduksi kekuatan (*strength reduction factor*), ϕ , yang besarnya ≤ 1 dan nilai faktor beban (*load factor*, α) yang besarnya ≥ 1 . Keduanya mewakili kondisi dimana kekuatan elemen struktur aktual dapat saja lebih rendah dari yang diperhitungkan dan beban aktual yang bekerja lebih besar dari yang direncanakan.

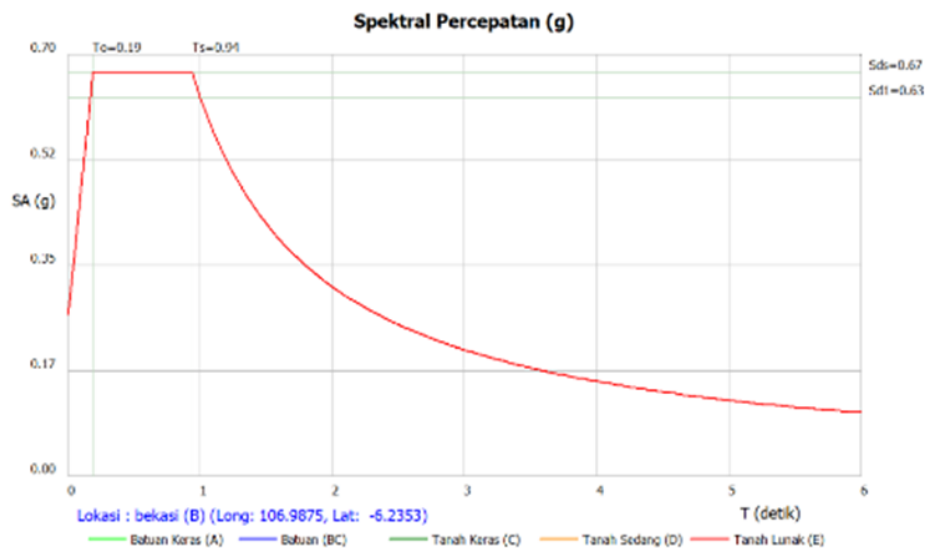
Beban-beban yang bekerja pada struktur adalah beban mati akibat berat sendiri elemen struktur, berat jenis dari material struktur yang sering digunakan pada bangunan industri adalah baja dengan berat jenis 7850 kg/m³ dan beton dengan berat jenis 2400 kg/m³. Beban Mati Tambahan merupakan berat komponen nonstruktural (Arsitektural dan MEP) yang sifatnya tetap pada struktur bangunan. Beban hujan perlu didesain agar dapat menahan beban genangan air hujan berdasarkan sudut kemiringan atap. Beban angin diambil berdasarkan geometri bangunan. Beban hidup adalah berat tambahan di luar beban mati yang besarnya ditentukan oleh peruntukan bangunan dengan harga minimum sesuai dengan Beban Minimum Untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain, SNI 1727:2020 (Badan Standardisasi Nasional, 2020a). Sementara beban gempa dihitung berdasarkan Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung dan Non Gedung, SNI 1726:2019 (Badan Standardisasi Nasional, 2019).

Berdasarkan Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung dan Non Gedung, SNI 1726:2019, pembebanan gempa dihitung sesuai parameter-parameter nilai respon spektra percepatan batuan dasar pada periode pendek (S_s), nilai respon spektra percepatan batuan dasar pada periode 1.0 detik (S_1), serta percepatan puncak batuan dasar (*Peak Ground Acceleration*, PGA) pada lokasi bangunan untuk gempa maksimum yang dipertimbangkan (*Maximum Considered Earthquake*, MCER) dengan probabilitas

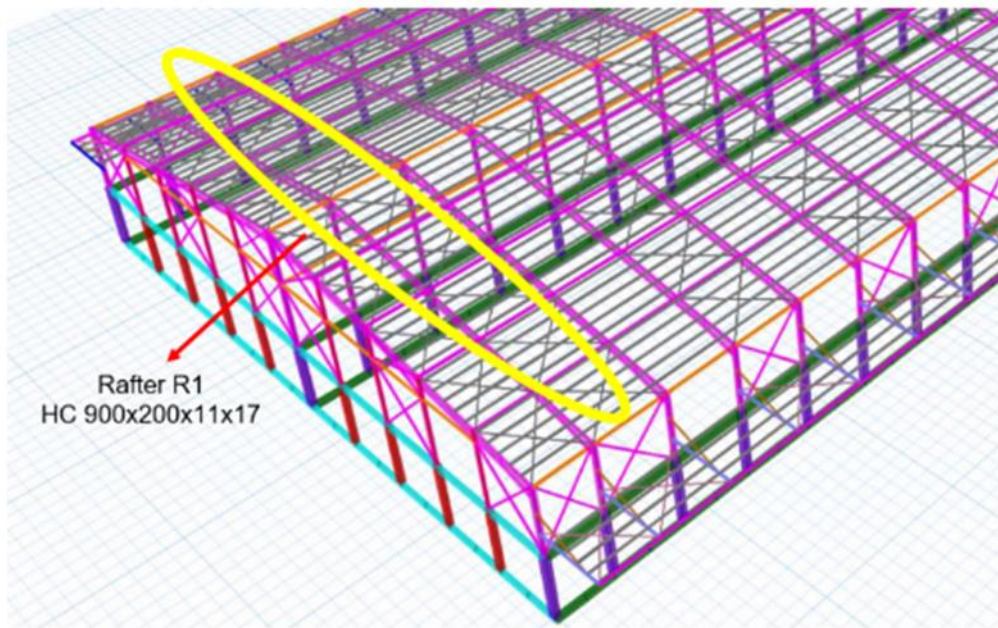
kejadian terlampaui 2% selama 50 tahun umur bangunan. Sesuai peta zonasi gempa Indonesia untuk wilayah Bekasi, nilai parameter-parameter tersebut adalah sebagai berikut:

1.	Kelas Situs	= SE - Tanah Lunak	9.	Fa	= 1.263592
2.	PGA	= 0.376119 g	10.	Fv	= 2.478555
3.	PGAm	= 0.544531 g	11.	Sms	= 1.005200 g
4.	CRs	= 0.000000	12.	Sm1	= 0.942746 g
5.	CR1	= 0.000000	13.	Sds	= 0.670134 g
6.	Ss	= 0.795510 g	14.	Sd1	= 0.628498 g
7.	S1	= 0.380361 g	15.	T0	= 0.187574 detik
8.	TL	= 20.000000 detik	16.	Ts	= 0.937869 detik

Sesuai SNI 1726:2019, struktur Gudang ini termasuk kategori resiko I (fungsi gudang penyimpanan), sehingga memiliki faktor keutamaan gempa sebesar 1.0. Digunakan kondisi tanah termasuk dalam Kelas Situs SE (Tanah Lunak). Kombinasi Pembebanan digunakan untuk menentukan gaya dalam yang bekerja pada seluruh elemen struktur, seperti pelat lantai, balok, kolom, dan tangga dengan menggunakan metode LRFD (*Load and Resistant Factor Design*). Berbagai kondisi yang mungkin terjadi pada struktur yaitu kombinasi dari Beban Mati (*Dead Load*), Beban Hidup (*Live Load*), Beban Angin (*Wind Load*), dan Beban Gempa (*Earthquake Load*). Kombinasi pembebanan yang digunakan didasarkan pada SNI 1726-2019. Permodelan serta hal-hal yang diinputkan ke dalam program untuk dianalisis yaitu input material, input permodelan struktur, dan input beban.

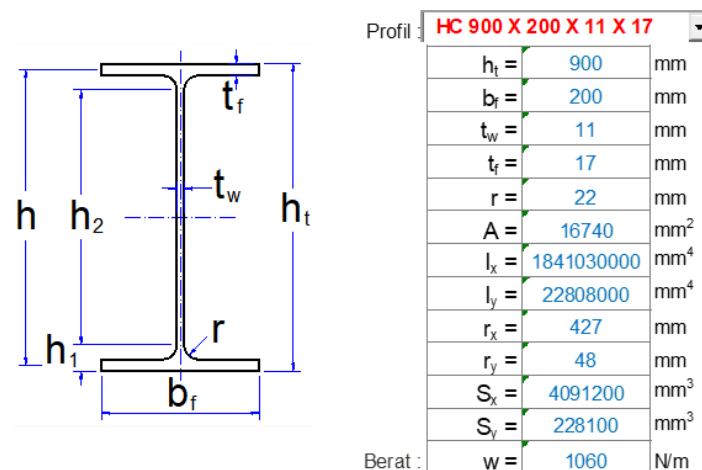


Gambar 6. Spektra Percepatan (g) Wilayah Bekasi



Gambar 7. Lokasi Pemeriksaan Baja Rafter

Pemeriksaan *rafter honeycomb* dengan data bahan tegangan leleh baja (f_y) 240 MPa, tegangan sisa (f_y) 70 MPa, modulus elastisitas baja 200000 MPa, dan angka poisson ratio 0.3. Profil dari baja yang digunakan dapat dilihat pada **Gambar 8**. Pemeriksaan detail terhadap kapasitas sambungan balok-kolom dilakukan menggunakan perangkat lunak yang memiliki kemampuannya dalam menganalisis sambungan baja secara komprehensif dengan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) (Siregar et al., 2024). Hasilnya visualisasi tegangan dan deformasi secara detail, sehingga memudahkan dalam mengevaluasi kinerja sambungan di bawah berbagai kondisi pembebanan. Selain itu, *software* ini juga telah terintegrasi dengan berbagai standar desain baja, seperti AISC dan Euro code, sehingga memudahkan dalam melakukan verifikasi desain (Nybacka, n.d.).

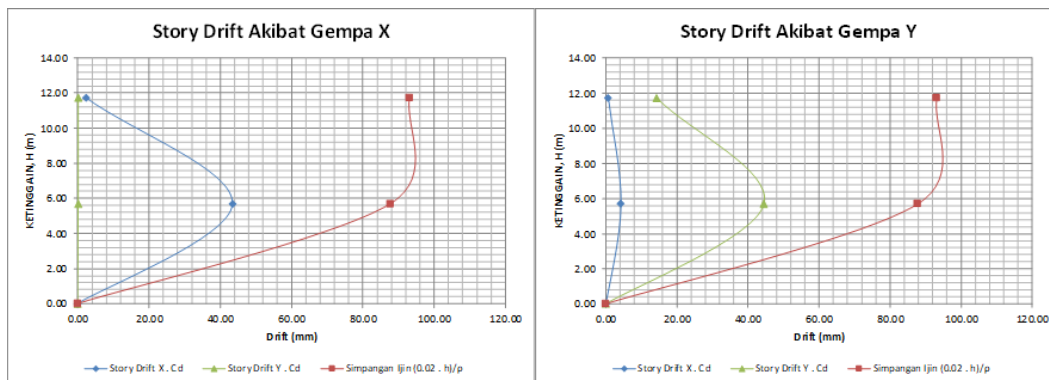


Gambar 8. Profil Baja Rafter

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

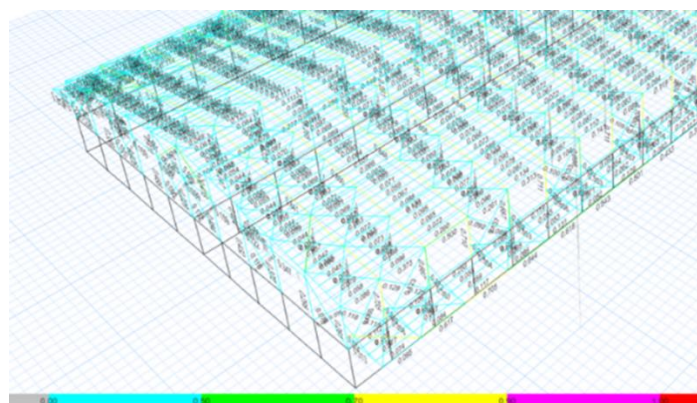
Hasil pemeriksaan perilaku struktur bangunan yaitu faktor gaya gempa statik, dinamik, dan pemeriksaan simpangan. Pemeriksaan lendutan dilakukan pada tengah bentang atap, pada *rafter* dengan $L = 30369$ mm, nilai lendutan akibat beban hidup adalah 60.492 mm dan akibat beban angin adalah 27.778 mm, sudah kecil dari lendutan izin $L/180$ (168 mm). Lendutan yang terjadi akibat beban mati dan hidup sebesar 94.258 mm, dimana nilai lendutan yang terjadi lebih kecil dari lendutan izin adalah 253.078 mm ($L / 120$).

Hasil pemeriksaan simpangan gaya gempa *lateral* arah X dan arah Y diperlihatkan pada **Gambar 8**. dibawah ini. Berdasarkan gambar nilai simpangan yang terjadi sudah kecil dari nilai simpangan izin.

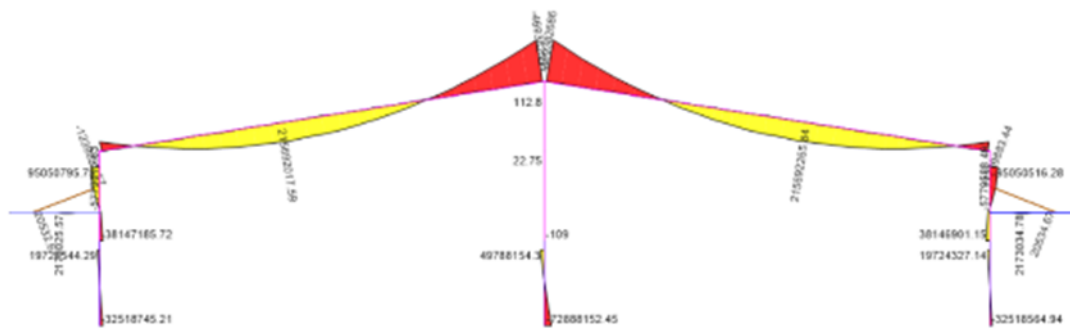


Gambar 9. Perbandingan Simpangan akibat Gempa

Hasil analisis *P-M ratio* struktur balok *rafter honeycomb* baja diperlihatkan pada **Gambar 9**. di bawah ini. Analisis tersebut menunjukkan bahwa nilai *P-M ratio* sudah kecil dari 1, yang menandakan bahwa struktur ini aman dalam menahan beban yang diterimanya. Hal ini berarti desain balok *rafter honeycomb* baja ini telah memenuhi syarat keamanan yang diharapkan dan mampu menahan tekanan dan gaya yang bekerja pada struktur tersebut tanpa mengalami kegagalan atau deformasi yang signifikan. Dengan demikian, penggunaan balok *rafter honeycomb* baja ini dapat diandalkan dalam aplikasi konstruksi yang memerlukan kestabilan dan kekuatan struktural tinggi.



Gambar 10. P-M Ratio Balok Rafter Honeycomb



Gambar 11. Momen *Rafter* pada Elemen Peninjauan

Momen yang terjadi akibat beban yang bekerja pada elemen yang ditinjau dapat dilihat pada **Gambar 10**. Hasil perhitungan kekuatan balok untuk melihat kapasitas balok terhadap gaya dalam akibat beban yang bekerja terdiri dari momen nominal pengaruh *local buckling* dan momen nominal pengaruh *lateral buckling*.

Berdasarkan nilai kelangsingan sayap, penampang masuk kedalam penampang non kompak. Nilai momen nominal pengaruh *local buckling* adalah 1191.86 kNm. Panjang bentang maksimum L_p adalah 2,45 m, Panjang bentang minimum L_r adalah 7,52, dan bentang yang sebenarnya L adalah 6,04 m, sehingga termasuk kedalam kategori bentang sedang, sehingga nilai momen nominal pengaruh *lateral buckling* yaitu perhitungan dengan pengaruh tekuk *lateral* adalah 1215.5 kNm.

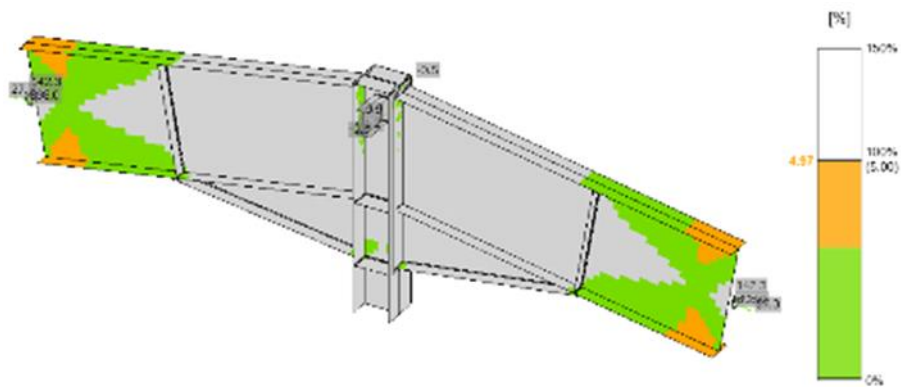
Tahanan momen lentur sudah memenuhi syarat bahwa momen ultimit (akibat beban) harus kecil dari momen nominal terkecil yang dikali dengan faktor reduksi ($\phi_b = 0.9$). Sehingga disimpulkan nilai tahanan momen sudah aman.

Tahanan geser dilakukan pengecekan ketebalan pelat badan yang memenuhi syarat. Gaya geser akibat beban terfaktor V_u adalah 141,545 kN sudah lebih kecil dari tahanan gaya geser nominal dikali faktor reduksi ($\phi_f = 0.75$) adalah 1069,200 kN. Perbandingannya adalah 0.75 (<1) sehingga nilai tahanan geser sudah aman.

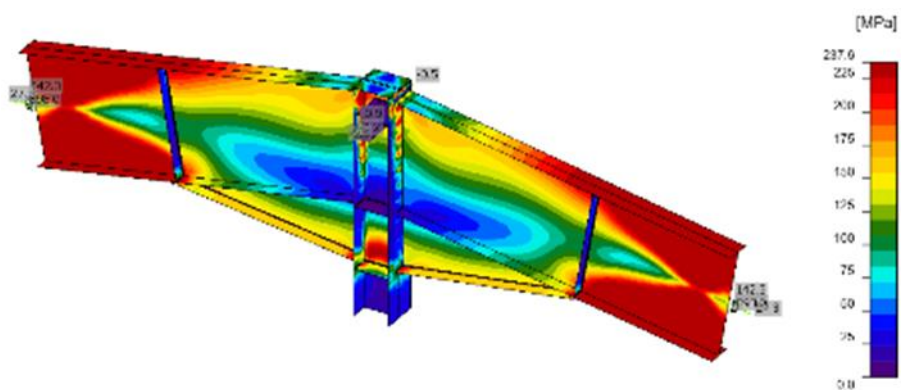
Kemudian dilakukan pengecekan interaksi geser dan lentur yang harus memenuhi syarat persamaan (1) dibawah ini. Hasilnya adalah 1.037 sudah kecil dari 1.375. Berdasarkan uraian diatas, artinya tidak terjadi buckling pada R1 HC 900x200x11x17. Menghindari terjadinya buckling pada *rafter* R1 digunakan pengaku balok WF 200X100X5.5X8.

$$M_u / (\phi_b M_u) + 0.625 V_u / (\phi_f V_u) < 1.375 \quad (1)$$

Menggunakan baut 24 A325M dan 16 A325M, hasil pemeriksaan sambungan berdasarkan standar AISC- LRFD dapat dilihat pada **Gambar 11**. Hasil pemeriksaan tahanan tarik adalah dan tahanan geser sudah lebih besar dari gaya tarik dan gaya geser akibat beban yaitu 210.2 kN $>$ 172 kN dan 126.1 Kn $>$ 9 kN. Detail pemasangan sambungan diperlihatkan oleh **Gambar 12..**

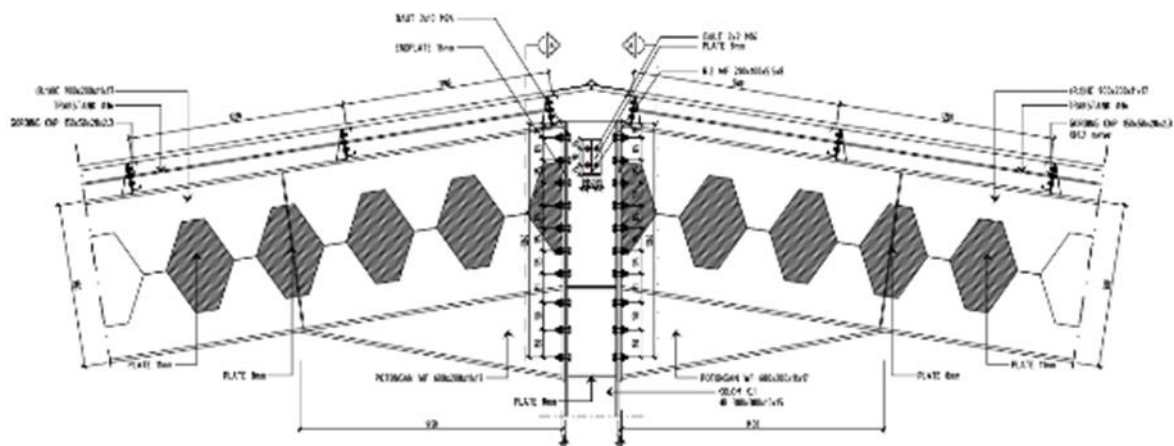


(a) Regangan



(b) Tegangan

Gambar 12. Hasil Visualisasi Regangan dan Tegangan Sambungan



Gambar 13. Detail Sambungan Balok *Rafter* HC900x200x11x17

4. KESIMPULAN

Hasil analisis menggunakan metode LRFD menunjukkan bahwa struktur gudang yang terletak di wilayah Bekasi dinyatakan aman terhadap gempa berdasarkan *output* analisis, karena tidak ditemukan indikasi *overstress* (OS). Elemen *rafter* atau kuda-kuda menggunakan profil HC 900x200x11x17, sedangkan elemen balok pengaku menggunakan WF 200X100X5.5X8, yang menunjukkan bahwa balok *rafter honeycomb* pada struktur ini sudah menggunakan dimensi profil yang memadai. Sambungan balok ke kolom menggunakan baut berdiameter 24 mm sebanyak 20 buah, dengan jarak antar baut 125 mm, jarak dari tepi pelat 75 mm, dan ketebalan pelat 16 mm. Sementara itu, sambungan balok pengaku antar *rafter* menggunakan baut berdiameter 16 mm sebanyak 4 buah, dengan jarak antar baut 90 mm, jarak dari tepi pelat 55 mm, dan ketebalan pelat 8 mm. Dengan desain ini, struktur gudang di wilayah Bekasi yang menggunakan balok *rafter honeycomb* dinyatakan cukup kokoh dan aman dalam menghadapi potensi beban gempa. Hal ini menjadikan desain struktur ini sebagai acuan yang dapat diandalkan untuk pembangunan gudang yang andal dan tahan gempa, khususnya untuk lokasi yang memiliki risiko gempa seperti Bekasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Gempa untuk Struktur Gedung dan Nongedung*. www.bsn.go.id
- Badan Standardisasi Nasional. (2020a). *SNI 1727:2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur lain*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020b). *SNI 1729:2020 Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*.
- Calledda, C., Montisci, A., & Porcu, M. C. (2021). Optimal design of earthquake-resistant buildings based on neural network inversion. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/app11104654>
- Feng, Y., Sun, X., Chen, B., & Ni, F. (2022). Optimal Design of *Honeycomb* Beams with Unit Cell Structure Based on Multiobjective Optimization Algorithm. *Security and Communication Networks*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/2874804>
- Morante-Carballo, F., Pinto-Ponce, B., Santos-Baquerizo, E., Briones-Bitar, J., Berrezueta, E., & Carrión-Mero, P. (2024). Systematic Review on Seismic Hazards in the Coastal Regions of the Pacific Ring of Fire. In *International Journal of Safety and Security Engineering* (Vol. 14, Issue 5, pp. 1591–1605). International Information and Engineering Technology Association. <https://doi.org/10.18280/ijssse.140526>
- Nybacka, J. (n.d.). *Comparative Study of AISC Specifications & Idea StatiCa Development of AISC Based Excel Tools*.
- Siregar, H., Aswin, M., & Syam, B. (2024). Structural Behavior Analysis of the Beam-Column Connections of Existing Steel Structure Buildings based on Finite Element Modeling-Idea StatiCa. *E3S Web of Conferences*, 519. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451904009>
- Suhana, N., & Mudofar, A. (n.d.). *ANALISIS EFEK PENGGUNAAN HONEYCOMB BEAM PADA BANGUNAN GEDUNG BERTINGKAT BENTANG LEBAR*.
- Tsavdaridis, K. D., Kingman, J. J., & Toropov, V. V. (2015). Application of structural topology optimisation to perforated steel beams. *Computers and Structures*, 158, 108–123. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.05.004>